

航空制造过程中的质量工程管理与优化策略研究

何 阵 李 伟 周文明

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723000

摘 要：航空制造质量工程管理以“预防为主、持续改善”为核心，融合PDCA循环与风险矩阵分析工具，具有高安全性、高可靠性等“三高一严”要求及行业特殊性。全流程中，设计、零部件制造、装配集成、检测验证等阶段均存在质量问题。通过构建全流程质量管控框架、供应链协同管理体系及质量成本管控体系，结合技术创新、流程优化、人员管理和数字化智能化赋能等优化策略，可提升航空制造质量，保障航空安全。

关键词：航空制造；质量工程管理；优化策略

1 航空制造质量工程管理的理论基础与核心要求

1.1 质量工程管理核心理论

航空制造质量工程管理的核心理论建立在“预防为主、持续改善”的基石之上。这一理念贯穿于产品设计、原材料采购、生产制造、装配集成、检测验证到交付使用的全生命周期。其本质是通过数据驱动的决策机制，将质量风险控制在萌芽阶段。例如，在飞机机身焊接过程中，采用激光扫描仪实时监测焊缝质量，利用机器学习模型分析焊接参数波动规律，提前识别潜在缺陷。这种基于过程控制的质量管理方法，突破了传统事后检验的局限性，形成“设计-制造-检验-改进”的闭环体系^[1]。国际航空运输协会（IATA）的研究表明，实施预防性质量管理的企业，其产品返工率可降低40%以上，客户投诉率下降65%。质量管理的理论框架融合了PDCA循环与风险矩阵分析工具。在C919客机项目中，项目团队针对复合材料结构件制造，构建了包含128个质量控制点的风险数据库。通过FMEA（失效模式与影响分析）方法，对每个控制点进行风险优先级排序，重点监控高风险工序。这种系统化的风险管理方法，使关键部件的一次交检合格率从78%提升至96%。质量管理的数字化转型趋势明显，波音公司开发的QualityIntelligencePlatform系统，通过整合2000余个传感器数据，实现生产过程的实时质量画像，将质量异常响应时间从小时级缩短至分钟级。

1.2 航空制造的质量核心要求

航空产品的质量要求呈现“三高一严”特征：高安全性、高可靠性、高耐久性与极端严格的适航标准。以航空发动机涡轮叶片为例，其工作温度超过1500℃，需承受每平方厘米数吨的离心力，材料纯净度要求达到99.999%以上。这类部件的制造误差必须控制在微米级，相当于人类头发丝直径的1/50。适航当局对关键部件实

施“零缺陷”政策，任何超过允许偏差0.1%的产品都将被拒收。质量追溯体系是航空制造的另一核心要求。空客A350项目建立了覆盖200万零部件的全生命周期追溯系统，每个部件拥有唯一的数字孪生模型，记录从原材料熔炼到总装下线的全流程数据。批次钛合金螺栓出现疲劳裂纹时，系统可在2小时内定位到具体熔炼炉次、热处理工艺参数及操作人员信息。这种透明化的质量管控模式，使空客的单机质量成本降低18%，同时将客户满意度提升至92分（百分制）。

1.3 航空制造质量工程管理的特殊性

航空制造的质量管理具有显著的行业特殊性：其一，技术复杂性导致质量风险隐蔽性强。现代客机包含超过600万个零部件，涉及材料科学、空气动力学、电子工程等20余个专业领域。其二，供应链全球化加剧质量管控难度。波音787项目涉及9个国家的1300余家供应商，文化差异、标准不统一等问题曾导致碳纤维复合材料铺层角度偏差，影响机身结构强度。其三，适航认证的严格性形成独特的质量门槛。FAA的FAR25部、EASA的CS25部等法规，对飞行载荷、防火性能、电磁兼容性等提出量化指标，发动机为满足鸟撞测试要求，进行了127次全尺寸撞击试验，累计消耗试验鸟4.2吨。这种特殊性要求航空企业建立“技术-管理-文化”三位一体的质量体系。罗罗公司（Rolls-Royce）推行的“质量文化2025”战略，通过虚拟现实（VR）技术开展沉浸式质量培训，使新员工对质量标准的理解准确率提升35%。同时，建立质量风险准备金制度，按营业收入的3%提取专项资金用于质量改进，这种财务保障机制使企业能够从从容应对突发质量事件。

2 航空制造全流程质量问题诊断与分析

2.1 设计阶段的质量隐患

设计缺陷是航空产品质量的源头性风险。直升机尾

浆传动轴设计时,未充分考虑高海拔地区空气密度变化对轴承润滑的影响,导致在青藏高原试飞时出现润滑失效故障。进一步分析发现,设计团队仅依据标准大气条件进行计算,未开展极端工况仿真。类似问题在航空发动机压气机叶片设计中也普遍存在,气动弹性稳定性分析不足曾导致多起叶片颤振断裂事故^[2]。设计评审流程的缺陷同样不容忽视,无人机项目在初步设计评审(PDR)阶段,未邀请适航当局代表参与,导致后续详细设计评审(CDR)时发现37项与适航条款不符的设计特征,造成6个月的进度延误。改进后的“四眼原则”评审机制,要求每个设计决策必须经过设计、工艺、质量和适航四方确认,使设计变更率下降52%。

2.2 零部件制造阶段的质量问题

材料质量问题占零部件缺陷的40%以上。航空锻件厂曾因电渣重熔工艺控制不当,导致GH4169高温合金晶粒度超标,使型发动机涡轮盘疲劳寿命缩短60%。材料追溯系统的缺失,使得问题批次涉及的其他锻件无法及时召回,造成重大经济损失。加工工艺稳定性是另一关键挑战,在飞机起落架外筒的深孔钻削中,刀具磨损导致孔径超差0.03mm,引发批量报废。通过引入在线测量系统和自适应加工技术,实时调整切削参数,使孔径一致性达到 $\pm 0.005\text{mm}$ 。数控机床的几何精度补偿技术也至关重要,企业通过激光干涉仪定期校准机床坐标系,将五轴联动加工误差从0.1mm降至0.02mm。

2.3 装配集成阶段的质量风险

装配顺序错误是常见的人为失误。在飞机总装线上,因操作手册未明确燃油管路安装与电气线路敷设的先后顺序,导致两者交叉干扰,引发燃油泄漏风险。通过开发增强现实(AR)装配指导系统,将三维模型与实际操作场景叠加,使装配错误率下降78%。接口匹配问题直接影响系统集成质量,平台与有效载荷的电连接器公差配合不当,导致接触电阻超标,在真空环境下引发电弧放电。改进后的接口控制文件(ICD)管理机制,采用公差带叠加分析方法,确保所有接口的累积误差不超过允许值的60%。

2.4 检测验证与交付阶段的质量短板

检测设备的精度直接影响质量判断。企业使用的三坐标测量机因环境温度波动未补偿,导致机匣的形位公差测量误差达0.05mm,超出设计要求0.02mm。引入恒温测量室和温度补偿算法后,测量重复性提升至0.005mm。试验验证的充分性是质量保障的最后防线。无人机在地面振动试验中,仅按标准载荷的100%进行考核,未模拟实际飞行中的动态过载,导致首飞时出现结构共振。改

进后的试验方案增加150%极限载荷测试,并引入随机振动谱分析,使结构可靠性提升3个数量级。

3 航空制造质量管理体系构建

3.1 全流程质量管控框架设计

基于AS9100D标准构建的“五纵五横”质量管控框架,纵向覆盖设计、采购、生产、试验、交付五大阶段,横向整合组织保障、流程控制、风险管控、数据管理和持续改进五个维度^[3]。在C929宽体客机项目中,该框架通过标准化流程优化和数字化工具应用,将质量文件数量缩减30%,同时质量记录完整性提升至99.9%。作为核心载体的数字化质量管控平台,如西飞公司开发的QMS4.0系统,集成MES、ERP、PLM等12个业务系统数据,实现质量计划自动生成、异常实时预警及纠正措施闭环跟踪。平台上线后,质量信息传递效率提升80%,问题闭环周期缩短65%,有效支撑了复杂航空产品的全生命周期质量管控,确保各阶段质量活动符合国际适航标准与客户需求。

3.2 供应链质量协同管理体系

供应商分级管理是供应链质量协同的基础。空客公司建立的“钻石-黄金-白银-青铜”四级供应商体系,通过差异化合作策略强化质量协同。钻石级供应商可参与早期设计研发,享受优先订单分配;青铜级供应商则面临淘汰风险。例如,发动机燃油泵供应商因连续三次交付延迟,被降级为青铜级,订单份额从40%锐减至10%,倒逼其投资2000万元升级生产线。联合质量改进机制通过“质量诊所”平台促进协同,波音与供应商利用视频会议系统实时共享质量数据,联合分析问题根源。在777X项目翼梢小翼制造中,该平台使沟通效率提升5倍,问题解决周期从2周缩短至3天,显著提升了供应链整体质量表现。

3.3 质量成本管控体系

质量成本分类管理是优化投入的关键路径。将质量成本细分为预防成本、鉴定成本、内部损失成本和外部损失成本四类,通过数据分析识别成本驱动因素。航空结构件企业通过实证研究发现,预防成本占比每提升1%,外部损失成本可下降2.3%。基于此,该企业将年度质量预算的60%投向预防活动,如员工培训、工艺优化等,有效降低了后期质量损失。质量成本预测模型依托机器学习算法,构建质量成本与生产参数的非线性回归模型。在航空发动机叶片制造中,该模型准确预测热处理温度波动对质量成本的影响,指导企业将温度控制精度从 $\pm 5^\circ\text{C}$ 提升至 $\pm 2^\circ\text{C}$,单件质量成本降低18%,实现了质量成本与产品性能的双赢优化。

4 航空制造质量工程管理的优化策略

4.1 技术创新驱动的质量提升

增材制造技术为复杂结构件质量提升提供新路径。GE公司采用电子束熔化（EBM）技术制造LEAP发动机燃油喷嘴，将零件数量从20个减至1个，重量减轻25%，同时通过过程监控系统确保每个喷嘴的孔径一致性达到 $\pm 0.003\text{mm}$ 。该技术使燃油效率提升15%，故障率下降90%。数字孪生技术实现质量全要素映射。卫星在地面测试阶段，通过数字孪生模型模拟太空环境下的热变形，提前发现太阳翼展开机构的设计缺陷，避免在轨故障。该技术使卫星测试周期缩短40%，成本降低35%。

4.2 流程优化与标准化建设

精益六西格玛方法推动流程再造。在一航空电子企业，应用DMAIC（定义-测量-分析-改进-控制）方法优化印制板焊接流程，将缺陷率从500ppm降至50ppm，同时减少30%的返工工时。标准化作业指导书（SOP）的视觉化改造，使操作一致性提升60%。标准化文件体系是质量传承的载体。中航工业建立“三层级”标准体系：第一层为国家军用标准（GJB），第二层为行业规范（HB），第三层为企业内控标准。无人机项目通过该体系，将设计经验转化为127项企业标准，使新机型研发周期缩短30%。

4.3 人员管理与质量意识提升

分层培训体系满足差异化需求。针对新员工，开发VR模拟装配培训系统，通过虚拟场景练习关键工序，使培训周期从2周缩短至3天；针对管理人员，开展质量领导力培训，强化质量战略思维^[4]。企业实施该体系后，员工质量知识测试平均分从62分提升至85分。质量激励机制激发内生动力。成飞公司设立“质量英雄榜”，每月评选质量改进明星，给予奖金、晋升优先等奖励。优秀班组因提出飞机蒙皮铆接工艺改进方案，年节约成本200万元，班组全体成员获得年度质量贡献奖。

4.4 数字化与智能化赋能

人工智能在质量检测中展现巨大潜力。企业开发的

基于深度学习的表面缺陷检测系统，可识别0.01mm级的划痕、裂纹等缺陷，检测速度达每分钟120件，是人工检测的20倍。该系统在大型发动机机匣检测中，将漏检率从5%降至0.2%。区块链技术保障质量数据可信，在飞机钛合金结构件供应链中，应用区块链技术记录原材料熔炼、热处理、机加工等全流程数据，确保数据不可篡改。当批次零件出现质量问题时，可在10分钟内完成全链条追溯，比传统方式提速200倍。航空制造质量工程管理是技术、管理与文化的深度融合。通过构建全流程管控框架、创新技术应用、优化人员管理，航空企业能够持续提升产品质量，在激烈的市场竞争中赢得先机。未来，随着数字化、智能化技术的深入应用，航空制造质量工程管理将迈向更高水平的自动化、精准化和智能化，为全球航空安全提供更坚实的保障。

结束语

航空制造质量工程管理意义重大，关乎航空安全与行业发展。其涉及多环节、多要素，面临技术复杂、供应链分散等诸多挑战。通过构建完备体系，从全流程管控到供应链协同，从成本管控制到技术创新应用，多维度提升质量。未来，数字化、智能化技术将进一步赋能，推动质量管理迈向更高水平，为航空事业稳健发展筑牢根基，助力航空企业在全局竞争中脱颖而出。

参考文献

- [1]董刚刚.航空制造企业提升质量管理工具应用效果的策略[J].大众标准化,2024,(01):31-33.
- [2]黄辉,李瑞琪.基于复杂网络的航空制造供应链关键节点识别研究[J].航空工程进展,2023,14(06):167-177.
- [3]赵宝林.航空制造企业依托研制资源开展航空装备维修保障的探索与实践[J].航空维修与工程,2021,(12):12-14.
- [4]邱凌,张安思,李少波,张仪宗,沈明明,周鹏.航空制造知识图谱构建研究综述[J].计算机应用研究,2022,39(04):968-977.